

# 融合改进 RRT 和 TEB 算法的移动焊接机器人 路径规划

王鹏杰, 李丹, 付金岗, 龚旭, 赵文杰

(安徽工业大学电气与信息工程学院, 安徽马鞍山 243032)

**摘要:** 针对移动焊接机器人路径规划中快速遍历随机树 (RRT) 算法搜索时间较长、易生成曲折且避障性能差的路径, 以及时间弹性带 (TEB) 算法存在速度输出跳变等不足, 提出 1 种改进 RRT 和 TEB 的移动焊接机器人路径规划融合算法。引入目的性扩展和关键点提取策略改进 RRT 算法, 提高算法的搜索效率和规划路径的平滑性; 引入最小安全距离对速度的约束改进 TEB 算法, 使移动焊接机器人能够有效避开障碍物, 同时增加目标点对速度的约束, 减少对移动焊接机器人的冲击; 融合改进 RRT 和 TEB 算法, 使移动焊接机器人能够动态规划路径, 避免动态障碍物的干扰, 且对其进行仿真和实物验证。结果表明: 改进 RRT 算法的路径搜索时间减少了 58.84%, 路径拐点数减少了 73.33%; 融合改进的 RRT 与 TEB 算法用于移动焊接机器人的路径规划, 机器人与障碍物之间的安全距离增加了 50%, 在到达目标点前可提供足够的速度缓冲时间, 极大提高了机器人运行的稳定性和避障能力。

**关键词:** RRT 算法; TEB 算法; 路径规划; 移动焊接机器人

**中图分类号:** TP 242 **文献标志码:** A **doi:** 10.12415/j.issn.1671-7872.23166



## Path Planning of Mobile Welding Robot Based on Fusion Algorithms of Improved RRT and TEB

WANG Pengjie, LI Dan, FU Jingang, GONG Xu, ZHAO Wenjie

(School of Electrical & Information Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan 243032, China)

**Abstract:** To address the issues of the rapidly-exploring random tree (RRT) algorithm, such as long search times, generation of zigzag paths, and poor obstacle avoidance, as well as the drawbacks of the time-elastic band (TEB) algorithm, such as speed output jumps, a hybrid path planning algorithm for mobile welding robots that improved both RRT and TEB was proposed. A purposeful extension and key point extraction strategies were introduced to improve the RRT algorithm, and to enhance the search efficiency and smoothness of path planning. Furthermore, a minimum safety distance was introduced to improve the TEB algorithm, which enabled the mobile welding robot to effectively avoid obstacles, while increasing the constraint of target points on speed and reducing the impact on the mobile welding robot. By integrating the improved RRT and TEB algorithms, the welding robots could dynamically plan its path, and avoiding interference from dynamic obstacles. Simulations and physical validations of this approach were conducted. The results demonstrate that the path search time with the improved RRT algorithm is reduced by 58.84%, and the number of path inflection points is reduced by 73.33%. The fusion of improved RRT

收稿日期: 2023-11-07

基金项目: 安徽省自然科学基金项目 (2108085MF225)

作者简介: 王鹏杰 (2000—), 男, 安徽铜陵人, 硕士生, 主要研究方向为机器人自主导航等。

通信作者: 李丹 (1976—), 女, 安徽马鞍山人, 博士, 教授, 主要研究方向为图像处理与机器人视觉、自主导航等。

引文格式: 王鹏杰, 李丹, 付金岗, 等. 融合改进 RRT 和 TEB 算法的移动焊接机器人路径规划 [J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2024, 41(6): 620-626.

and TEB algorithms can increase the safe distance between the mobile welding robot and obstacles by 50%. It also provides sufficient speed buffer time before reaching the target point, which greatly enhances the stability and obstacle avoidance ability of the mobile welding robot.

**Keywords:** RRT algorithm; TEB algorithm; path planning; mobile welding robot

随着智能制造的快速发展,传统焊接越来越难以满足高效率和高精度的生产需求,因此移动焊接机器人的智能化应用正日益成为关注的焦点<sup>[1]</sup>。路径规划是移动焊接机器人智能化应用的基础,其关键在于能够在复杂、不确定的环境中规划出1条无碰撞、流畅的最优路径<sup>[2-3]</sup>。路径规划分为全局路径规划和局部路径规划<sup>[4-5]</sup>,全局路径规划用于制定整体路径,相关算法如A\*<sup>[6-9]</sup>、Dijkstra<sup>[10]</sup>、快速遍历随机树(rapidly-exploring random tree, RRT)<sup>[11-12]</sup>等;局部路径规划专注于实时避障,相关算法如动态窗口(dynamic window approach, DWA)<sup>[13]</sup>、时间弹性带(timed elastic band, TEB)<sup>[14-15]</sup>等。全局路径规划与局部路径规划算法的应用可为机器人提供高效精确且安全的导航能力。但是,移动焊接机器人的应用环境不同于通用工业机器人,需应对严苛的生产环境,且目前移动焊接机器人存在搜索时间较长、避障性能差等不足。因此,进一步优化移动焊接机器人的路径规划,对于提升机器人的实际应用能力,使其更好地适应复杂的工作环境和多变的焊接任务具有重要的现实意义。

在移动焊接机器人的全局路径规划中,RRT算法无需对环境进行栅格化处理,且对动态场景有强大的适应性,被广泛应用。但传统RRT算法的随机扩展不具备导向性,影响路径搜索效率,且规划的路径曲折,不利于移动焊接机器人的实际运动。为提高RRT算法的性能,国内外学者提出了不同优化策略。Lavalle<sup>[16]</sup>基于目标偏置策略提出Bias-RRT算法,使路径扩展的方向一定概率地指向目标点;刘恩海等<sup>[17]</sup>利用人工势场法的思想,使目标点对机器人产生引力,有利于降低RRT算法的随机性。上述2种改进算法均提高了RRT算法的导向性,但在障碍物较多的场景中易陷入局部搜索。马新国等<sup>[18]</sup>提出二次搜索的概念,通过Dijkstra算法对RRT算法的采样区域进行二次搜索,生成最优路径,但牺牲了搜索效率;Qi等<sup>[19]</sup>提出1种多目标RRT\*算法,使机器人能够实时动态规划路径,但路径平滑性差,不适合机器人的实际运动。

在移动焊接机器人的局部路径规划中,TEB算法能满足基本的避障需求,但速度输出不稳定,导致

机器人易受到冲击。针对以上问题,郭烈等<sup>[20]</sup>提出融合PID(proportion integral differential)控制的TEB算法,可减小速度的震荡程度,机器人运动流畅;陈奕梅等<sup>[21]</sup>通过VO(velocity obstacle)算法二次约束TEB算法的输出量,同时设计自适应参数动态调节模块,可提升机器人速度输出的平缓性;代婉玉等<sup>[22]</sup>对障碍物进行膨胀处理,并对机器人行驶区域进行分级处理,可使机器人的行驶路线位于安全区域。现有改进算法多考虑机器人运动过程中的速度平滑性和避障能力,但仍无法消除机器人在到达目标点时因速度跳变导致的冲击。鉴于此,提出1种改进RRT和TEB的融合算法,全局路径规划阶段,动态调整RRT算法的采样概率实现目的性扩展,同时采用关键点提取策略平滑全局路径;局部路径规划阶段,引入最小安全距离和目标点约束TEB算法的输出速度,以期提升移动焊接机器人的避障与稳定性。

## 1 路径规划融合算法

引入目的性扩展和关键点提取策略改进RRT算法,提高移动焊接机器人在静态地图全局路径规划中的搜索效率和路径平滑性;为同时提高移动焊接机器人的避障能力和稳定性,在TEB算法中引入最小安全距离和目标点对速度进行约束。最终将两者融合,使机器人具备实时避障的能力,融合算法的流程如图1。

### 1.1 RRT算法的改进

#### 1.1.1 目的性扩展

传统RRT算法的路径节点扩展存在一定的盲目性,易降低搜索效率,通过目的性扩展限制扩展方向对其进行改进。设置1个目标采样概率 $P_{goal}$ ,每次随机采样前通过RRT算法中的随机函数产生随机概率 $P_{rand}$ ,当 $P_{goal}$ 不小于 $P_{rand}$ 时,将目标点 $X_{goal}$ 设为采样点;反之,按照正常的随机采样流程进行,可用式(1)表示。

$$X_{rand} = \begin{cases} X_{goal}, P_{rand} \leq P_{goal} \\ X_{random}, P_{rand} > P_{goal} \end{cases}, P_{rand} \in (0, 1] \quad (1)$$

式中 $X_{random}$ 为随机采样点。对于无障碍物环境,设 $P_{goal}$ 为90%,传统和改进RRT算法规划的路径如图2。

观察图2可知:改进RRT算法规划的路径更短,路径扩展的分支更精简。有障碍物环境中,如果采用

与无障碍物环境相同的操作,给定1个固定的 $P_{goal}$ ,易使系统陷入局部搜索,需根据障碍物动态调整 $P_{goal}$ 。

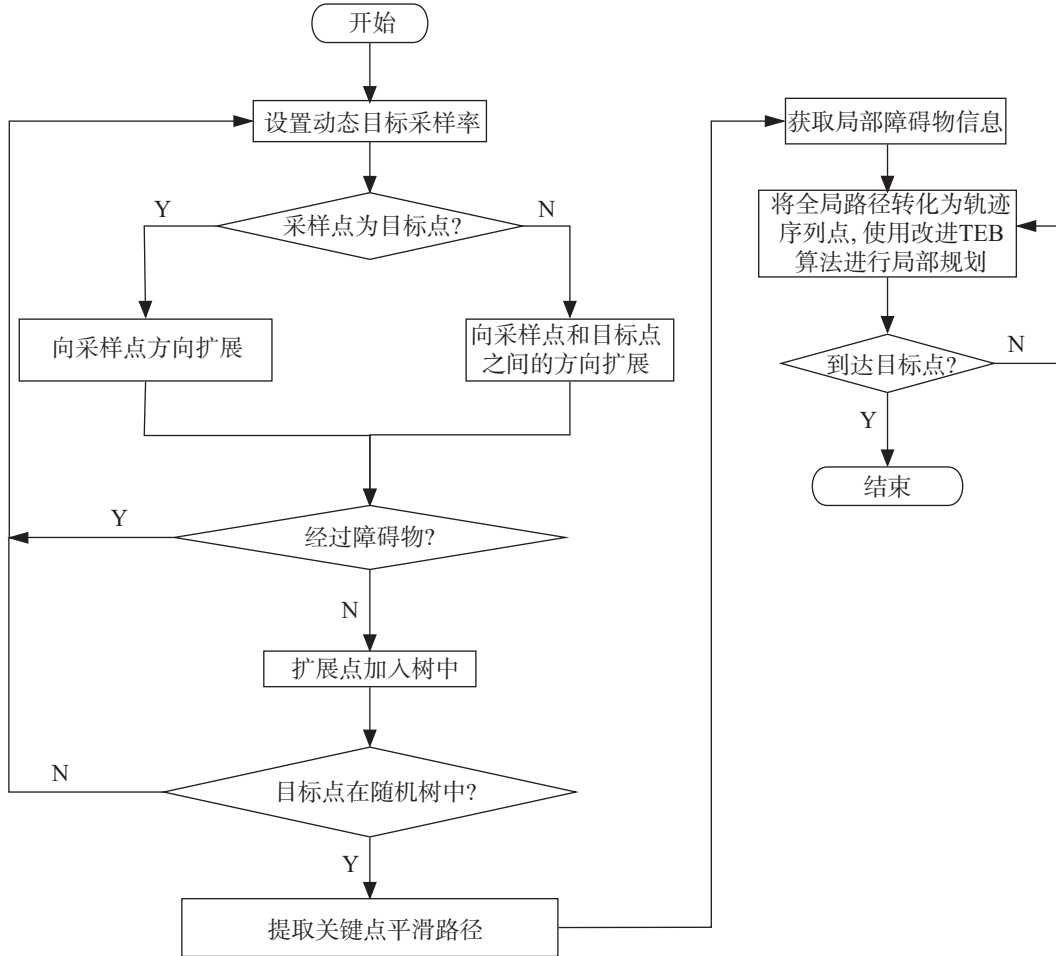
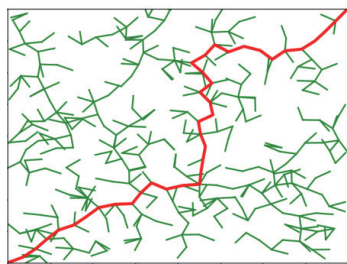
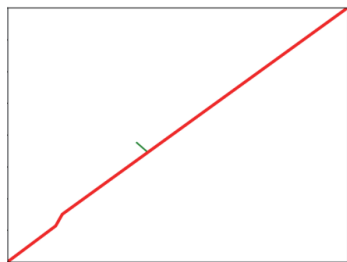


图1 融合算法流程图

Fig. 1 Flowchart of fusion algorithm



(a) 传统RRT算法



(b) 改进RRT算法

图2 无障碍下传统与改进RRT算法规划的路径

Fig. 2 Paths planned by traditional and improved RRT algorithms in obstacle-free environment

采样后,在随机扩展树上找到距离采样点 $X_{rand}$ 最近的节点 $X_{near}$ ,沿 $X_{near}$ 至 $X_{rand}$ 的方向扩展一定步长,获取新节点 $X_{new}$ 。当 $X_{new}$ 没有加入随机扩展树中,说明 $X_{new}$ 与 $X_{near}$ 的连线经过障碍物,即通过扩展次数和随机扩展树中的节点数可判断障碍物在采样空间所占的比重。设 $N_{search}$ 为扩展次数, $N_{node}$ 为随机扩展树中的节点数,则动态目标采样概率数为

$$P_{goal} = N_{node} / N_{search} \quad (2)$$

$N_{node}$ 与 $N_{search}$ 的比值越大,障碍物越少,目标点作为采样点的可能性越大; $N_{node}$ 与 $N_{search}$ 的比值越小,障碍物越多,采样点的随机性越大。

当 $X_{goal}$ 未被选为采样点时, $X_{new}$ 只受到 $X_{rand}$ 的影响,扩展缺乏目的性。为解决这一问题,同时考虑 $X_{rand}$ 和 $X_{goal}$ 对 $X_{new}$ 的影响,使新生成的节点具备目标偏向性,目标偏向原理如图3。

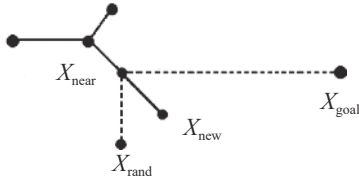


图3 目标偏向示意图

Fig. 3 Schematic diagram of target deviation

$X_{new}$  的横纵坐标表达式如下:

$$\begin{cases} \alpha = \arctan \frac{y_{goal} - y_{near}}{x_{goal} - x_{near}} \\ \beta = \arctan \frac{y_{rand} - y_{near}}{x_{rand} - x_{near}} \\ x_{new} = x_{near} + s \left( \frac{\cos \alpha + \cos \beta}{2} \right) \\ y_{new} = y_{near} + s \left( \frac{\sin \alpha + \sin \beta}{2} \right) \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\alpha$  为采样点  $X_{goal}$  和  $X_{near}$  的连线与  $x$  轴之间的夹角;  $\beta$  为采样点和  $X_{near}$  的连线与  $x$  轴之间的夹角;  $x_{new}$ ,  $y_{new}$  为新节点的坐标;  $x_{goal}$ ,  $y_{goal}$  为目标点的坐标;  $x_{rand}$ ,  $y_{rand}$  为采样点的坐标;  $x_{near}$ ,  $y_{near}$  为距离采样点最近节点的坐标;  $s$  为扩展步长。

### 1.1.2 关键点提取策略

RRT 算法规划的路径曲折不仅不利于移动焊接机器人运动, 而且增加路径成本。对此, 文中采用关键点提取策略对路径进行平滑处理, 图 4 为关键点提取策略的示意图。

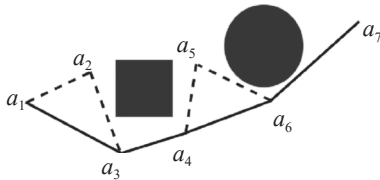


图4 关键点提取策略示意图

Fig. 4 Schematic diagram of key point extraction strategy

关键点提取策略的步骤如下:

- 1) 获取改进 RRT 算法的路径节点, 设立 1 个节点集合  $\{a_i | i = 0, 1, 2, \dots, n\}$ ;
- 2) 对节点集合内的拐点进行碰撞检测, 设  $a_{i+1}$  为碰撞检测点, 将  $a_i$  和  $a_{i+2}$  的连线等距划分, 得到若干小节点, 若小节点在障碍物区域内, 则  $a_{i+1}$  为关键点;
- 3) 循环步骤 2), 直至提取所有的关键点;
- 4) 将相邻关键点的连线根据一定比例划分, 提取若干节点并加入关键点, 防止关键点数过少无法为 TEB 算法提供足够的位姿序列;
- 5) 根据关键点生成新路径。

利用关键点提取策略可删除 RRT 算法规划路径的冗余拐点, 降低路径成本, 提升路径平滑性。

## 1.2 TEB 算法的改进

文中设计的移动焊接机器人底盘为四轮差速底盘, 运动模型如图 5。

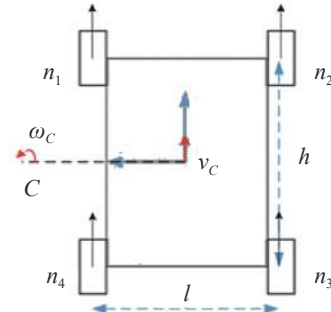


图5 四轮差速底盘运动模型

Fig. 5 Motion model of four wheel differential chassis

图中:  $n_1, n_2, n_3, n_4$  为四轮的转速;  $v_C$  为底盘中心的线速度;  $\omega_C$  为底盘中心的角速度;  $C$  为底盘的旋转中心点;  $l$  为左右轮的轴距;  $h$  为前后轮的轴距。四轮差速底盘同一侧车轮的转速相等, 故用  $n_L$  表示左侧车轮的转速, 用  $n_R$  表示右侧车轮的转速, 则四轮差速底盘的运动表达式为

$$\begin{bmatrix} n_L \\ n_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -l/2 \\ 1 & l/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_C \\ \omega_C \end{bmatrix} \quad (4)$$

### 1.2.1 最小安全距离对速度的约束

TEB 算法以时间最短为目标, 倾向于输出最快速度, 因此移动焊接机器人的前进轨迹与障碍物的距离并不会远大于最小安全距离。为提高移动焊接机器人的避障能力, 文中在 TEB 算法中加入最小安全距离对速度的约束。加入约束后的线速度为

$$v_i = \frac{d_{obstacle} - d_{min}}{\Delta T_i d_{min}} \begin{bmatrix} |x_{i+1} - x_i| \\ |y_{i+1} - y_i| \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中:  $v_i$  为第  $i$  个时间间隔的线速度;  $(x_i, y_i)$  为第  $i$  个时间间隔的坐标信息;  $\Delta T_i$  为第  $i$  个时间间隔;  $d_{obstacle}$  为机器人与障碍物的距离;  $d_{min}$  为机器人与障碍物的最小安全距离。这一约束使 TEB 算法规划的路径与障碍物之间保持足够的安全距离, 最大程度降低移动焊接机器人与障碍物之间的碰撞几率。

### 1.2.2 目标点对速度的约束

TEB 算法会使机器人在运动过程中尽可能保持最大速度的状态, 当机器人到达目标点时, 速度急剧下降至零, 移动焊接机器人无法平稳停在目标点, 需在目标点附近提供 1 个速度缓冲的区域。文中通过增加目标点对速度的约束, 确保机器人在接近目标点时平稳减速, 避免运动不稳定的情况发生。此时, 线速度可表示为

$$v_i = \begin{cases} v_i, d_{goal} > d_{threshold} \\ v_i d_{goal} / d_{threshold}, d_{goal} \leq d_{threshold} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $d_{goal}$ 为机器人当前位置与目标点的距离;  $d_{threshold}$ 为机器人速度缓冲的范围。

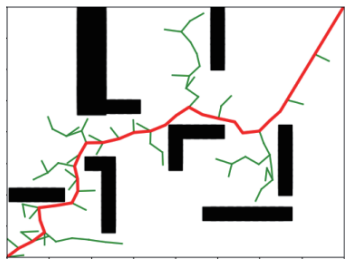
## 2 实验与结果分析

### 2.1 仿真实验

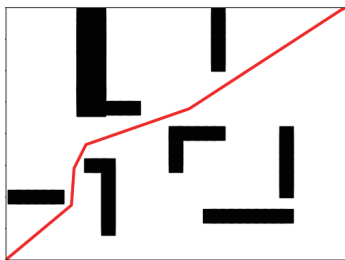
为评估改进 RRT 算法的性能,采用传统和改进 RRT 算法在多障碍物环境中进行路径规划实验。由 pycharm 构建 2 种仿真地图,其中地图 1 障碍物为矩形;地图 2 障碍物为圆形。RRT 算法改进前后规划的路径如图 6, 7。图中,红色线条为算法规划的路径,绿色线条为随机树扩展的路径分支。



(a) 传统RRT算法



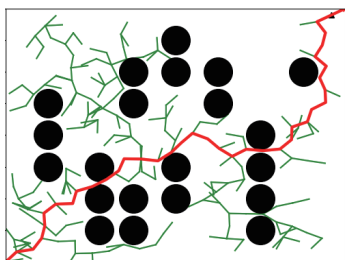
(b) 目的性扩展后的RRT算法



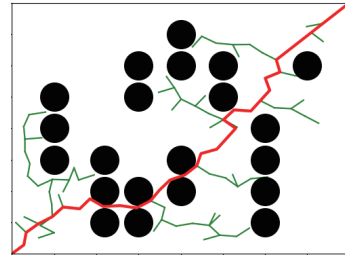
(c) 路径平滑后的RRT算法

图6 地图 1 中 RRT 算法改进前后的规划路径

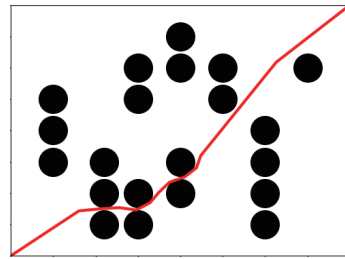
Fig. 6 Planned paths before and after improvement of the RRT algorithm in map 1



(a) 传统RRT算法



(b) 目的性扩展后的RRT算法



(c) 路径平滑后的RRT算法

图7 地图 2 中 RRT 算法改进前后的规划路径

Fig. 7 Planned paths before and after improvement of the RRT algorithm in map 2

由图 6, 7 可看出: 传统 RRT 算法规划的路径曲折, 随机树扩展的无用节点较多; 改进 RRT 算法规划的路径明显优于传统 RRT 算法。这是由于通过目的性扩展限制扩展方向后, 随机树的扩展节点数明显降低, 提取关键点后, 路径转折点的数量减少, 路径平滑性明显提升。表 1 为传统和改进 RRT 算法在 2 种多障碍物环境中进行 30 次路径规划实验结果的平均数据。由表 1 可看出: 相较于传统 RRT 算法, 改进 RRT 算法平均搜索时间减少了 58.84%, 平均迭代次数减少了 58.79%, 平均路径长度缩短了 19.9%, 平均路径拐点减少了 73.33%。

表 1 RRT 算法改进前后的仿真实验结果

Tab.1 Simulation experiment results before and after improvement of the RRT algorithm

RRT算法	搜索时间/s	路径长度/m	迭代次数/次	路径拐点/个
传统	3.963	39.14	199	30
改进	1.631	29.35	95	8

### 2.2 实物验证

为进一步验证融合算法的有效性,在实际环境中搭建 1 款移动焊接机器人,如图 8。移动焊接机器人上位机为研华工控机,搭载 ubuntu18.04 系统,使用 SICK 激光雷达和 Gmapping 建图算法,并根据图 9 的实验环境构建二维栅格地图,如图 10。

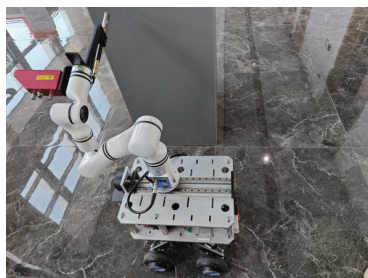


图8 移动焊接机器人

Fig. 8 Mobile welding robot



图9 实验环境

Fig. 9 Experimental environment

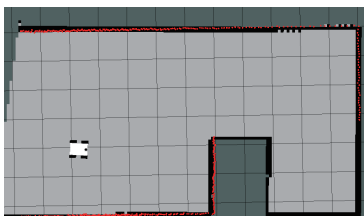
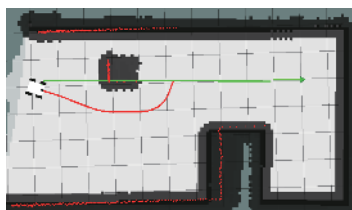


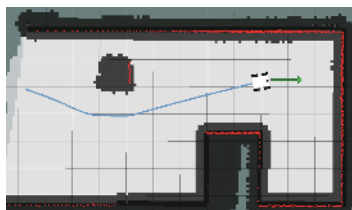
图10 栅格地图

Fig. 10 Grid map

在路径起点和终点间摆放 1 个方形纸盒作为临时障碍物, 采用本文融合算法、改进 RRT 和传统 TEB 融合算法对图 8 所示的移动焊接机器人进行路径规划, 结果如图 11, 12。图中, 红色线条为局部路径, 绿色线条为全局路径, 蓝色线条为移动焊接机器人的运动轨迹。



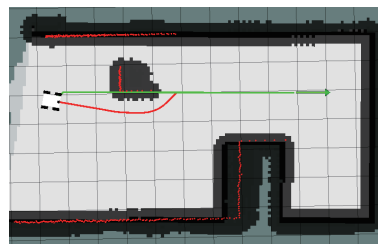
(a) 位于起点位置



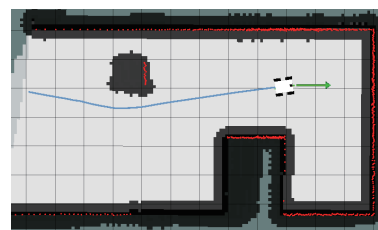
(b) 位于终点位置

图11 本文融合算法的实验结果

Fig. 11 Experimental results of the fusion algorithm presented in this paper



(a) 位于起点位置



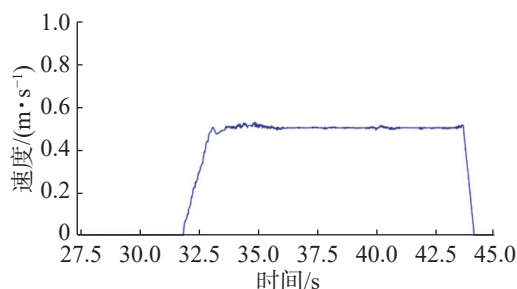
(b) 位于终点位置

图12 改进 RRT 和传统 TEB 融合算法的实验结果

Fig. 12 Experimental results of the fusion algorithm of improved RRT and traditional TEB

由图 11, 12 可知: 改进 RRT 算法规划的全局路径经过了临时障碍物, 对于改进 RRT 和传统 TEB 的融合算法, 机器人与障碍物的平均安全距离为 0.5 m; 对于本文融合算法, 机器人与障碍物的平均安全距离为 1.0 m, 较传统 TEB 算法的平均安全距离增加了 50%, 表明改进 TEB 算法使融合算法的避障性能明显提升。

图 13 为 2 种融合算法下移动焊接机器人的速度曲线, 纵轴为移动焊接机器人的线速度, 横轴为移动焊接机器人的运动时间, 设移动焊接机器人最大速度为 0.5 m/s,  $d_{\text{threshold}}$  为 1.5 m, 即当移动焊接机器人的位置与目标点间的直线距离为 1.5 m 时, 移动焊接机器人开始减速。图 13 表明: 改进 RRT 和传统 TEB 的融合算法到达终点所花时间为 12.0 s, 速度缓冲时间为 0.5 s; 本文融合算法总计时间花费 15.3 s, 速度缓冲时间远大于改进 RRT 和传统 TEB 的融合算法, 为 5.3 s。由此看出, 在 TEB 算法中引入目标点对速度的约束, 极大提升了移动焊接机器人的稳定性。



(a) 融合改进RRT和传统TEB算法

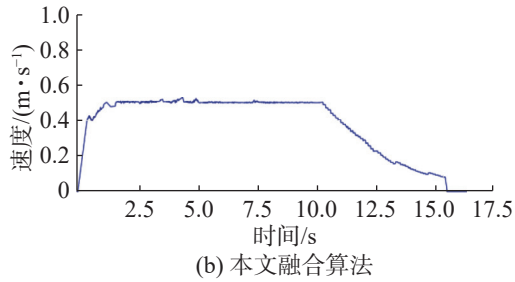


图13 移动焊接机器人的速度曲线

Fig. 13 Speed curve of mobile welding robot

综上所述,本文融合算法不仅成功弥补了 RRT 算法在实时避障方面的不足,而且展现了改进 TEB 算法的有效性,可极大提升移动焊接机器人的稳定性。

### 3 结论

针对移动焊接机器人路径规划过程中,传统 RRT 算法搜索效率低下、路径曲折且避障性能弱,以及 TEB 算法速度输出不稳定等不足,提出 1 种改进的 RRT 和 TEB 路径规划融合算法。在 RRT 算法中,通过目的性扩展提高搜索效率;通过关键点提取策略降低路径转折点的数量,提升路径的平滑性。在 TEB 算法中,引入最小安全距离对速度的约束,使移动焊接机器人与障碍物之间保持足够距离;同时,通过增加目标点对速度的约束,提高移动焊接机器人的稳定性。仿真实验与实物实验结果表明:相较于传统 RRT 算法,改进的 RRT 算法搜索效率提高了 58.84%,路径拐点数减少了 73.33%;采用本文融合算法进行路径规划,移动焊接机器人不仅具备动态避障能力,还与障碍物之间的安全距离增加了 50%,可有效避免机器人在到达目标点时受到的冲击。

#### 参考文献:

- [1] 杜明, 范伟. 浅谈焊接生产现状及焊接技术发展[J]. 湖北农机化, 2019(2):55-57.
- [2] WANG B, LIU Z, LI Q, et al. Mobile robot path planning in dynamic environments through globally guided reinforcement learning[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2020, 5(4):6932-6939.
- [3] SAEED R A, RECUPERO D R, REMAGNINO P. A boundary node method for path planning of mobile robots[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2020, 123:103320.
- [4] SHIARLIS K, MESSIAS J, WHITESON S. Rapidly exploring learning trees[C]// 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Singapore: IEEE, 2017:1541-1548.
- [5] 黄起源, 陈书琦, 占华程, 等. 室内移动机器人的平稳移动全局路径规划方法: CN114510056A[P]. 2022-05-17.
- [6] 蒋林, 潘锋, 李峻, 等. 一种移动机器人新型骨架提取的 Voronoi 路径规划算法: CN111323037A[P]. 2020-06-23.
- [7] BAYILI S, POLAT F. Limited-damage A\*: a path search algorithm that considers damage as a feasibility criterion[J]. *Knowledge-Based Systems*, 2011, 24(4):501-512.
- [8] 程传奇, 郝向阳, 李建胜, 等. 融合改进 A\* 算法和动态窗口法的全局动态路径规划[J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(11):137-143.
- [9] 吴凡, 张华, 童以, 等. 多传感器融合的温室机器人自主导航系统设计[J]. 安徽科技学院学报, 2023, 37(6): 96-102.
- [10] 宋江一, 李丹, 陈文博. 融合 Dijkstra 和 PID 算法的室内移动机器人局部路径规划[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2023, 40(1):59-64.
- [11] 彭君. 改进 RRT 算法在移动机器人路径规划中的应用研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2022.
- [12] CHEN J, ZHAO Y, XU X. Improved RRT-connect based path planning algorithm for mobile robots[J]. *IEEE Access*, 2021, 9:145988-145999.
- [13] LEE D H, LEE S, AHN C K, et al. Finite distribution estimation-based dynamic window approach to reliable obstacle avoidance of mobile robot[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2021, 68(10):9998-10006.
- [14] 李秀智, 赫亚磊, 孙炎珺, 等. 基于复合式协同策略的移动机器人自主探索[J]. 机器人, 2021, 43(1):44-53.
- [15] 郑凯林, 韩宝玲, 王新达. 基于改进 TEB 算法的阿克曼机器人运动规划系统[J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(10): 3997-4003.
- [16] LAVALLE S M. *Planning Algorithms*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2006:482-580.
- [17] 刘恩海, 高文斌, 孔瑞平, 等. 改进的 RRT 路径规划算法[J]. 计算机工程与设计, 2019, 40(8):2253-2258.
- [18] 马新国, 马希青. 融合改进 RRT 和 Dijkstra 算法的机器人动态路径规划[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2023(2): 5-9.
- [19] QI J, YANG H, SUN H X. MOD-RRT: a sampling-based algorithm for robot path planning in dynamic environment[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2021, 68(8):7244-7251.
- [20] 郭烈, 齐国栋, 赵一兵, 等. 融合 A\* 与 TEB 算法的机器人多任务导航调度研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2023, 51(2):82-88.
- [21] 陈奕梅, 沈建峰, 李柄棋. 改进 TEB 算法的多机器人动态避障策略研究[J]. 电光与控制, 2022, 29(5):107-112.
- [22] 代婉玉, 张丽娟, 吴佳峰, 等. 改进 TEB 算法的局部路径规划算法研究[J]. *计算机工程与应用*, 2022, 58(8): 283-288.